

©1995

## ОБНАРУЖЕНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПРЕЦЕССИИ НАМАГНИЧЕННОСТИ В КРИСТАЛЛАХ

*Д.А.Романов, Е.Г.Рудашевский, Е.И.Николаев, В.А.Мухамедьяров*

Институт общей физики РАН, Москва  
(Поступила в Редакцию 16 ноября 1994 г.)

Исследовался однородный ферромагнитный резонанс (ФМР) в одноосной эпитаксиальной феррит-гранатовой пленке в окрестности ориентационного фазового перехода. Для регистрации ФМР использовалась методика магнитооптического детектирования, позволяющая непосредственно измерять амплитуду прецессии намагниченности. Экспериментально обнаружен новый нелинейный эффект — несимметричная прецессия намагниченности. Эффект проявляется в том, что центр траектории прецессии смещается относительно равновесного положения намагниченности. Это смещение пропорционально квадрату амплитуды прецессии и зависит от ориентации равновесной намагниченности относительно магнитного поля и кристаллографических осей. Несимметричность прецессии максимальна вблизи ориентационного фазового перехода и быстро убывает с ростом поля. Предложена модель, объясняющая эффект несимметричной прецессии искажениями симметричной потенциальной ямы под действием кубической анизотропии. Отмечено, что несимметричная прецессия намагниченности не может регистрироваться стандартными радиоспектроскопическими методами.

Из существующей теории линейного ферромагнитного резонанса (ФМР) следует, что траекторией прецессии намагниченности является замкнутая кривая второго порядка (окружность или эллипс). При этом явно или неявно предполагается, что центр траектории прецессии совпадает с равновесным положением намагниченности. Как показано в настоящей работе, это предположение не выполняется в случае произвольной ориентации равновесной намагниченности относительно внешнего магнитного поля и осей симметрии магнитного кристалла.

Мы исследовали ФМР в однородно намагниченной эпитаксиальной феррит-гранатовой пленке состава  $(\text{LuBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  с ориентацией  $\{111\}$ . Образец имел следующие параметры: намагниченность насыщения  $4\pi M_s = 40 \text{Gs}$ , поле одноосной анизотропии  $H_a = 890 \text{Oe}$  (легкая ось перпендикулярна поверхности), поле кубической анизотропии  $H_k = 230 \text{Oe}$ , гиромагнитное отношение  $\gamma = 1.08 \cdot 10^7 \text{s} \cdot \text{Oe}$ , ширина линии ФМР  $\Delta H = 30 \text{Oe}$ , толщина пленки  $d = 6 \mu\text{m}$ , константа фарадеевского вращения  $\mu = 0.66 \text{K}/\mu\text{m}$ .

Схема эксперимента приведена на вставке к рис. 1. Внешнее магнитное поле в плоскости  $\vec{H}$  от 0 до  $2\text{kOe}$  индуцировало в образце ориентационный фазовый переход от доменной структуры в однородное состояние. ФМР на частотах  $f = 0.3\text{--}1.2 \text{GHz}$  возбуждался переменным

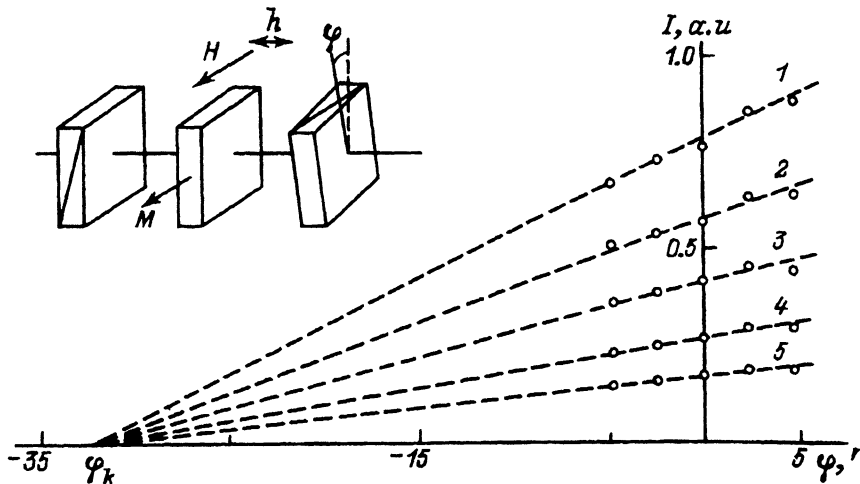


Рис. 1. Экспериментальные зависимости интенсивности магнитооптического сигнала  $I$  от угла поворота анализатора  $\varphi$  при различной относительной амплитуде поля накачки.

$h$  (dB): 1 — 0, 2 — -2, 3 — -4, 4 — -6, 5 — -8. На вставке — схема эксперимента.

магнитным полем накачки  $h$ , направленным перпендикулярно плоскости пленки. Для повышения чувствительности установки применялась модуляция поля накачки меандром на частоте  $\Omega = 400$  Hz (глубина модуляции 100%). Для регистрации прецессии намагниченности использовалась методика магнитооптического детектирования [1]. Свет от гелий-неонового лазера пропускался через поляризатор, образец и анализатор, отклоненный на малый угол  $\varphi$  от положения скрещенности. В висмутсодержащих феррит-гранатовых пленках фарадеевское вращение значительно превышает прочие магнитооптические эффекты, поэтому можно считать, что прецессия намагниченности в образце приводит к колебаниям плоскости поляризации (ПП) прошедшего света на частоте ФМР. После анализатора переменная составляющая оптического сигнала  $I$  измерялась с помощью ФЭУ и селективного вольтметра, настроенного на частоту модуляции. Образец закреплялся на поворотном устройстве, что позволяло изучать ФМР при различной ориентации намагниченности в плоскости пленки. Влияние кубической анизотропии на направление намагниченности компенсировалось небольшим отклонением поля  $H$ . При этом равновесная ориентация намагниченности контролировалась по эффекту Фарадея. В экспериментах регистрировалась зависимость  $I$  от амплитуды поля накачки  $h$  и угла поворота анализатора  $\varphi$  в однородно намагниченном состоянии при различной ориентации намагниченности  $M$  в плоскости пленки.

На рис. 1 представлены зависимости  $I$  от  $h$  и  $\varphi$ , полученные при ориентации намагниченности по оси типа  $[11\bar{2}]$ . При малых  $\varphi$  они описываются следующей формулой:

$$I(\varphi, h) \sim h^2 \left( \frac{\varphi}{\varphi_k} + 1 \right). \quad (1)$$

Экстраполируя линейные зависимости  $I(\varphi)$ , можно найти угол  $\varphi_k$  — такое положение анализатора, при котором магнитооптический сигнал от ФМР отсутствует. Это означает, что при данном положении анализатора интенсивность света, прошедшего через систему, не зависит от того, в каком состоянии находится образец — равновесном или возбужденном. Подчеркнем, что при повороте анализатора изменяется не сам резонанс в образце, а только лишь условия его наблюдения. Угол  $\varphi_k$  остается постоянным при изменении амплитуды поля накачки на два порядка. Было обнаружено, что зависимость  $\varphi_k$  от ориентации  $M$  в плоскости пленки описывается функцией  $1/\cos 3\phi$ , где  $\phi$  — азимутальный угол, отсчитываемый от оси  $[11\bar{2}]$ . Наименьшее значение угла  $\varphi_k$  достигается, когда  $M$  направлена по оси типа  $[11\bar{2}]$ . Если  $M$  направлена вдоль одной из осей типа  $[\bar{1}10]$ , амплитуда сигнала не зависит от поворота анализатора ( $\varphi_k \rightarrow \infty$ ) и зависимости  $I(\varphi)$  параллельны оси абсцисс. Такая симметрия свидетельствует о вкладе кубической анизотропии в наблюдаемый эффект.

Линейная зависимость  $I$  от  $\varphi$  означает, что ПП света после образца колеблется несимметрично относительно своего равновесного положения. Действительно, запишем угол отклонения ПП в виде

$$\varepsilon = \delta + \varepsilon_0 \cos \omega t, \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi f$  — частота ФМР,  $\varepsilon_0$  — амплитуда колебания ПП,  $\delta$  — динамическое смещение центра колебаний ПП относительно равновесного положения. Тогда учитывая, что поле накачки промодулировано меандром, получим для интенсивности низкочастотного переменного светового сигнала после анализатора

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T (\varphi + \varepsilon)^2 dt - \frac{1}{T} \int_0^T \varphi^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T (2\varphi\varepsilon + \varepsilon^2) dt \approx 2\varphi\delta + \frac{1}{2}\varepsilon_0^2, \quad (3)$$

где  $T = 2\pi/\omega$  — период прецессии намагниченности. Как видно из (3), величина  $I_{\varphi=0} = \frac{1}{2}\varepsilon_0^2$  определяется амплитудой колебаний ПП, а наклон прямых  $I(\varphi)$  зависит от степени несимметричности колебаний ПП  $\frac{dI}{d\varphi_{\varphi=0}} = 2\delta$ . Сравнивая (1) и (3), находим

$$\delta = \frac{\varepsilon_0^2}{4\varphi_k}, \quad \varepsilon_0 \sim h. \quad (4)$$

Следовательно, измеряя экспериментально угол  $\varphi_k$ , можно определить степень несимметричности колебаний ПП.

Естественно предположить, что наблюдаемый эффект обусловлен несимметричностью прецессии намагниченности относительно равновесного положения. Однако другим возможным механизмом формирования несимметричных колебаний ПП может быть анизотропия фарадеевского вращения при отклонении намагниченности от плоскости пленки. Для выяснения природы эффекта была получена зависимость  $1/\varphi_k$  от поля  $H$ , приведенная на рис. 2. Видно, что несимметричность

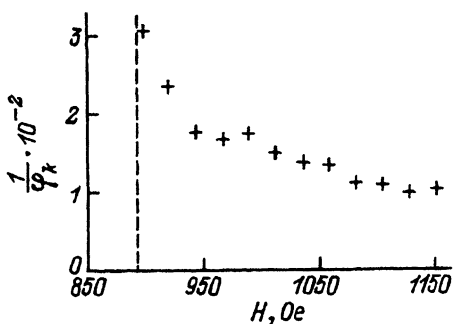


Рис. 2. Зависимость степени несимметричности прецессии от магнитного поля в плоскости.

Штриховой линией показана граница однородного состояния.

колебаний максимальна вблизи поля фазового перехода и быстро убывает с ростом  $H$ . Поскольку в малых полях магнитооптические эффекты практически не зависят от  $H$ , зависимость  $\varphi_k$  от  $H$  доказывает, что обнаруженный эффект обусловлен именно динамическими свойствами магнитной подсистемы. Наблюдаемый эффект нельзя объяснить неоднородностью феррит-гранатовой пленки по толщине. Действительно, если в каждом слое образца прецессия намагниченности симметрична, то и колебания ПП прошедшего света также должны быть симметричными.

Таким образом, проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что при возбуждении прецессии отклонения намагниченности в противоположные стороны от плоскости пленки могут быть не равны между собой. Другими словами, среднее направление намагниченности в возбужденном состоянии может отличаться от равновесного направления намагниченности. Как следует из (4), смещение между ними пропорционально квадрату  $h$ . Отношение этого смещения к общей амплитуде колебаний характеризует степень несимметричности прецессии. В частности, при максимально достижимой в нашем эксперименте амплитуде поля накачки  $h = 0.5$  Oe несимметричность достигает 10% от амплитуды колебаний намагниченности, равной  $4^\circ$ . В отличие от известных нелинейных эффектов, связанных со спин-волновой неустойчивостью, несимметричная прецессия намагниченности имеет беспороговый характер.

По нашему мнению, причиной эффекта несимметричности прецессии является искажение параболической формы потенциальной ямы под действием кубической анизотропии. Учет формы потенциальной ямы позволяет объяснить поведение угла  $\varphi_k$  при различной ориентации  $M$  в плоскости пленки. Ось  $[110]$  расположена симметрично по отношению к кубическим легким осям  $[100]$  и  $[010]$ , поэтому в данном случае траектория прецессии также симметрична относительно равновесного положения намагниченности. При ориентации  $M$  по оси  $[112]$  симметрия потенциальной ямы нарушена и смещение центра траектории прецессии максимально. Эту модель подтверждает и уменьшение несимметричности в больших полях. С ростом  $H$  относительный вклад энергии кубической анизотропии в термодинамический потенциал уменьшается и форма потенциальной ямы приближается к симметричной.

Отметим, что несимметричная прецессия намагниченности принципиально не может быть зарегистрирована с помощью обычных радиоспектроскопических методов. В резонаторных ФМР спектрометрах ре-

гистрируется, по сути, только площадь траектории прецессии. Амплитуду прецессии можно измерять с помощью микрополосковых антенн, которые применяются при изучении магнитостатических волн. Однако эта методика нечувствительна к положению траектории относительно равновесной ориентации намагниченности. Возможно, несимметричная прецессия намагниченности является одной из причин обнаруженного недавно эффекта асимметричных колебаний доменных границ [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 94-02-05689).

#### Список литературы

- [1] Dillon J.F.Jr, Kamimura H., Remeika J.P. J. Appl. Phys. **34**, 4, 1240 (1963).
- [2] Хван До Чен, Ким П.Д. ФТТ **32**, 9, 2549 (1990).